

# 遠心ポンプ羽根車の開放化が 気液二相流性能に及ぼす影響

佐藤 紳二\*, 浅野 芳宏\*, 古川 明徳\*\*

## Studies on Air-Water Two-Phase Flow Performance of a Centrifugal Pump with Open Impeller

Sinzi SATO\*, Yoshihiro ASANO\*, and Akinori FURUKAWA\*\*

Experiments of air/water two-phase flow performance were carried out for a centrifugal pump with open impeller to investigate effects of removing a part or the whole of shroud disks of an impeller. Results show that the adoption of open impeller by removing front shroud and an outer part of rear one is an effectiveness for improving two-phase flow pump performance. Changes of pump head in single-phase and two-phase conditions with removing shrouds are discussed qualitatively by considering influences of leakage flow from blade tip on the main flow distortion in impeller flow passages.

### 1. ま え が き

各種産業の輸送・処理プロセスの多様化とともにポンプの二相流問題が重要視されるようになり<sup>(1)</sup>, 二相流時の性能予測<sup>(2)(3)</sup>や通常のポンプを用いた実験による研究報告<sup>(4)(5)</sup>も数多くなされている。しかしながら, 通常のポンプは高々数%の気液混合比で揚水不能に陥るため, その使用範囲は著しく制限される結果となっており, 二相流ポンプ設計法の確立と気液二相流動機構の解明にもいまだ不明な点が数多く残されている<sup>(6)</sup>。著者らも, 気液二相流時における遠心ポンプの揚水性能改善に関連してこれまでに, 羽根車側板を取外し半開放羽根とした場合には高水流量域においてのみ<sup>(7)</sup>, さらに車板を取外し開放羽根とした場合には低水流量域においても改善効果が認められることを示したが<sup>(8)(9)</sup>, 半開放・開放, および水流量により効果の違いが生じる要因については明らかにすることができなかった。

そこで本報では, 遠心羽根車の車板・側板の有無がポンプの気液二相流性能に及ぼす影響を系統的な実験によって調査し, その結果から羽根車の半開放・開放化による二相流性能改善のメカニズムを考察する。

### 2. 実験装置および実験方法

供試ポンプは回転軸を鉛直に持つ立軸形で, その概略を図1に示す。開水槽の水は補助ポンプ, オリフィス(水の流量係数 $\phi_l$ ), 弁を通り, また圧縮機による加圧空気はレギュレータ, オリフィス(吸込断面①での静圧と水温における空気の流量係数 $\phi_g$ ), 弁を通りノズルから吸込管に流入する。吸込管で混合された気水は羽根車, 平行壁ディフューザ, 渦巻室を通り吐出管から水槽へ戻る。渦巻室高さ

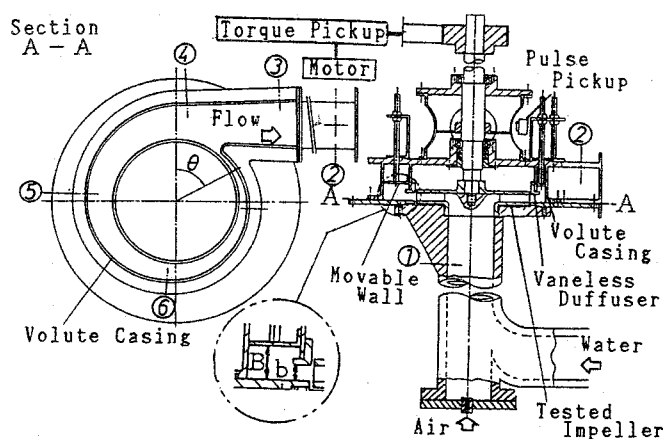


図1 供試ポンプ断面図

\* 機械工学科

\*\* 九州大学工学部

平成7年10月31日受理

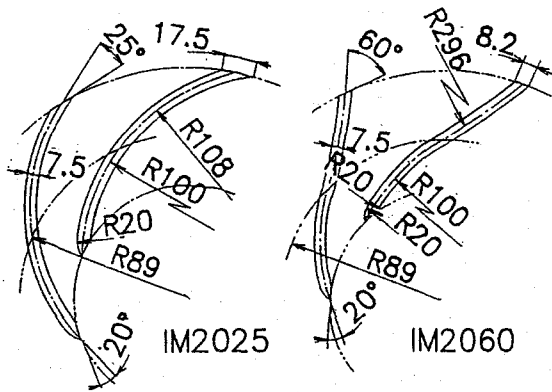


図2 供試羽根車羽根形状

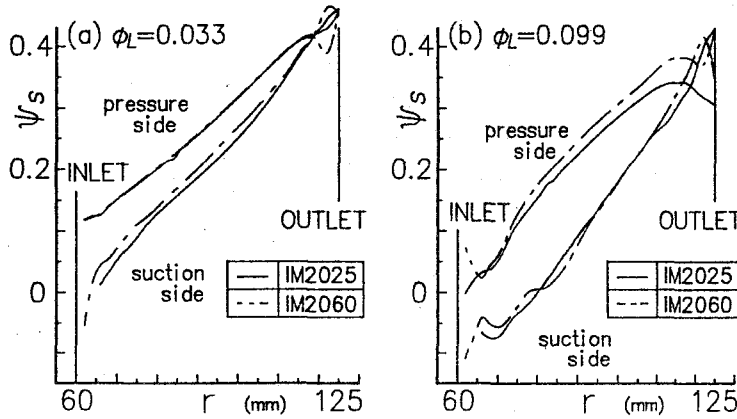


図3 供試羽根車内静圧分布計算結果

は可動壁により  $B = 25 \sim 55 \text{ mm}$  に可変であるがここでは羽根車自身の揚水性能を調べるために  $B = 25 \text{ mm}$  (一定) とした。<sup>(10)</sup>

実験は回転数  $1100 \text{ rpm}$ , 入口吸込圧  $0.1 \text{ MPa}$  (ゲージ圧) 一定で行い, 揚程は断面①と渦巻室出口断面③の静圧差から均質流の仮定のもとに動圧差を差引いて求めた。なお流量係数  $\phi$  は流量を羽根厚みを無視した羽根車出口断面積と周速  $U_2$  で割った値であり, 揚程係数  $\phi$  は揚程を  $(U_2^2/g)$  で割った値である ( $g$  は重力加速度)。

供試羽根車は入口角が  $\beta_1 = 20^\circ$  と等しく, 出口角が  $\beta_2 = 25^\circ$  (IM2025),  $60^\circ$  (IM2060) と異なる二次元羽根 8 枚をもつ 2 種類の羽根車を用いた。その羽根形状を図 2 に, 水単相流時における境界層厚さを考慮した非粘性計算による羽根面静圧 (係数  $\phi_s$ ) 分布を図 3 に示す。<sup>(11)</sup> 羽根車側板は, 設計流量において羽根前後の静圧差が最大となる半径  $80 \text{ mm}$  の位置で分割し, その内側と外側をそれぞれ別々に取外し可能とした。車板・側板の有無の組合せに対する羽根車の呼称を図 4 に示す。羽根高さ  $18 \text{ mm}$  に対して車板・側板を取外した時の羽根開放端とケーシング間のすき間は, いずれも  $1 \text{ mm}$  ですき間比  $\lambda = 1/18 = 0.06$  となり, 側板除去の実験<sup>(12)</sup> により得られた推奨値  $\lambda = 0.033 \sim 0.086$  を満足している。

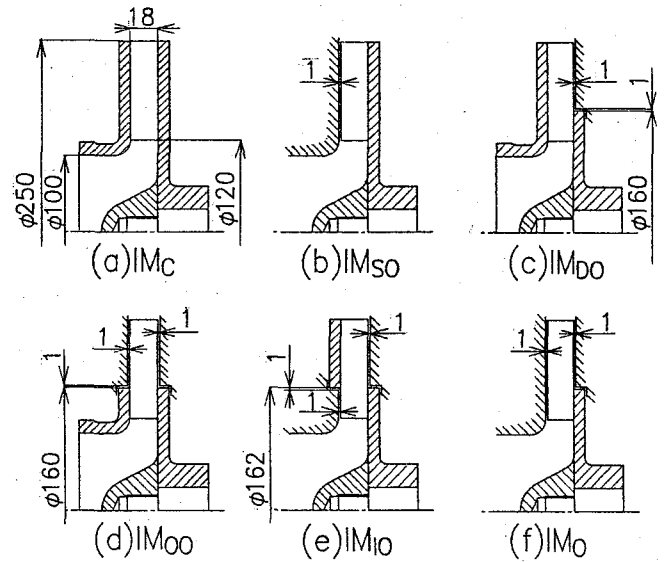


図4 供試羽根車形状

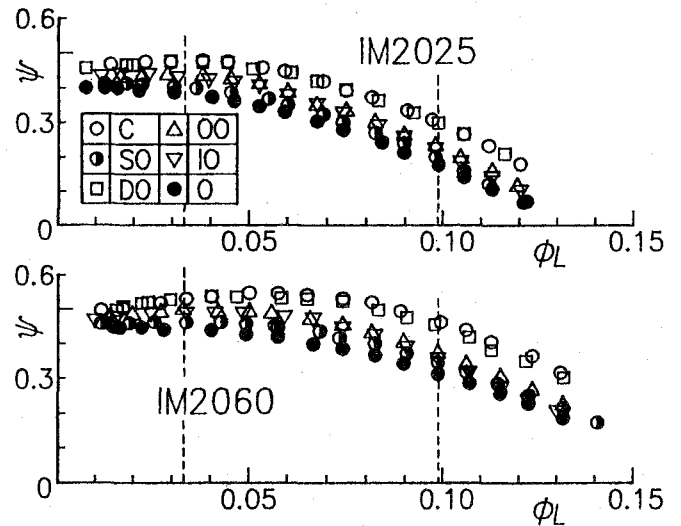


図5 水単相流時の揚程変化

### 3. 実験結果および考察

3.1 水単相流時の揚程変化 各羽根車における水単相流時の揚程 (係数  $\phi$ ) 変化を図 5 に示す。IMc, IMdo 羽根車, IMoo, IMio 羽根車, IMso, IMo 羽根車 と開放化を進めるほど揚程は低下し, 水流量 (係数  $\phi$ ) が大きいほど羽根前後の圧力差も大きく (図 3), 開放端からの漏れ流量が増えるため, その違いも顕著となる。また, 側板の有無によって結果は大きな違いを示し, 側板があり出口車板を除去された IMdo 羽根車は 密閉形の IMc 羽根車とほぼ同じ値を示し, 側板が無い IMso, IMo 羽根車も IMc 羽根車よりは低い値を示しながらほぼ同じ値を示すことから, 出口車板側からの漏れ流量は小さいことが推察される。一方側板を分割した IMoo と IMio 羽根車とでは揚程低下の度合は同程度である。

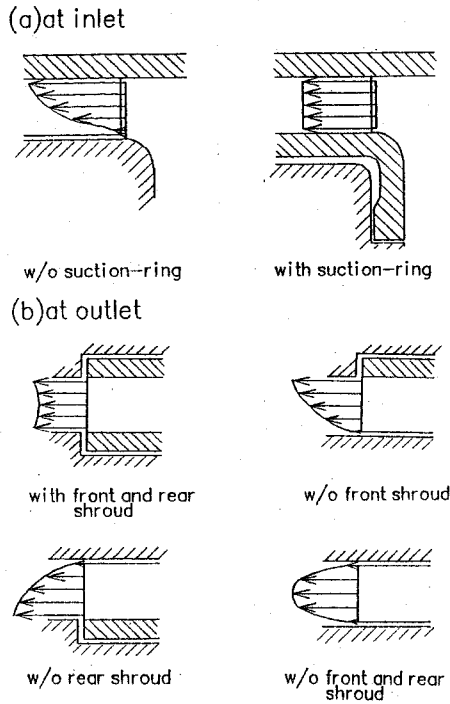


図6 羽根出口・入口における流速分布模図

羽根入口の流入状態については、吸込リング(入口側板)が無い場合、軸方向から半径方向への流れの転向の際生じるはく離のため、 $\phi_L$ の増加とともに車板側へ偏った流れとなるが<sup>(11)(13)</sup>、吸込リングがある場合は側板側の流体がリングとの摩擦により旋回成分を持つため、一様流入の傾向を示すと考えられる(図6(a))。また羽根出口の流出状態については、回転板がある場合は板面境界層二次流れの影響<sup>(11)</sup>により板面側に偏った流れとなるが、開放時には羽根開放端からの流れにより主流は反対側に偏る<sup>(14)</sup>ものと考えられる(図6(b))。そこでこのような主流の偏りに伴う揚程低下として、羽根出口車板・側板除去による揚程低下量をそれぞれ $\Delta\phi_D$ 、 $\Delta\phi_S$ 、羽根入口の吸込リング除去による低下量を $\Delta\phi_{SR}$ とし、これらの低下量を密閉形羽根車を用いた場合の揚程から次式のように単純に差引く形で各羽根車を用いた場合の揚程の予測を試みた。

$$(\phi_{SP})_{SO} = (\phi_{SP})_C - \Delta\phi_{SR} - \Delta\phi_S$$

$$(\phi_{SP})_{DO} = (\phi_{SP})_C - \Delta\phi_D$$

$$(\phi_{SP})_{OO} = (\phi_{SP})_C - \Delta\phi_D - \Delta\phi_S$$

$$(\phi_{SP})_{IO} = (\phi_{SP})_C - \Delta\phi_{SR} - \Delta\phi_D$$

$$(\phi_{SP})_O = (\phi_{SP})_C - \Delta\phi_{SR} - \Delta\phi_D - \Delta\phi_S$$

ここで下添字SPは水単相流時を表し、左辺と右辺の括弧の

表1 水単相流時の揚程予測結果

$\phi_L=0.033$	IM2025		IM2060	
	measured	predicted	measured	predicted
C	① 0.476	① 0.476	① 0.530	① 0.530
SO	⑤ 0.404	⑤ 0.403	⑤ 0.460	⑤ 0.454
DO	② 0.472	② 0.467	② 0.528	② 0.514
OO	③ 0.440	③ 0.436	③ 0.496	③ 0.480
IO	④ 0.436	④ 0.425	④ 0.492	④ 0.472
O	⑥ 0.384	⑥ 0.394	⑥ 0.440	⑥ 0.438
$\Delta\phi_{SR}$	0.042		0.042	
$\Delta\phi_D$	0.009		0.016	
$\Delta\phi_S$	0.031		0.034	

$\phi_L=0.099$	IM2025		IM2060	
	measured	predicted	measured	predicted
C	① 0.300	① 0.300	① 0.472	① 0.472
SO	⑤ 0.196	⑤ 0.192	⑤ 0.348	⑤ 0.343
DO	② 0.292	② 0.283	② 0.452	② 0.421
OO	③ 0.232	③ 0.242	③ 0.372	③ 0.359
IO	④ 0.220	④ 0.216	④ 0.360	④ 0.354
O	⑥ 0.178	⑥ 0.175	⑥ 0.316	⑥ 0.292
$\Delta\phi_{SR}$	0.067		0.067	
$\Delta\phi_D$	0.017		0.051	
$\Delta\phi_S$	0.041		0.062	

項に付いた下添字は各羽根車の呼称に対応する。前述の実験結果(図5)より、大流量では羽根前後の圧力差が大きく、 $\Delta\phi_D$ 、 $\Delta\phi_S$ 、 $\Delta\phi_{SR}$ の値も大となり、また各羽根車の揚水性能には $\Delta\phi_{SR}$ が最も強く影響し、 $\Delta\phi_D$ の影響は比較的小さいと推察される。これらのことを考慮して $\Delta\phi_D$ 、 $\Delta\phi_S$ 、 $\Delta\phi_{SR}$ をそれぞれ実験結果から見積り、上式により得た計算結果を実測値と比較して表1に示し、予測流量点を図5に破線で示す。 $\Delta\phi_D$ 、 $\Delta\phi_S$ 、 $\Delta\phi_{SR}$ は実験結果から見積ったものであり、数値の定量的議論は意味が無いが、表中に○で囲んだ数字は揚程が高い順位を示すもので、計算値の結果は実測値の結果と一致した傾向を与えている。このことから、羽根車内での主流の偏りの違いが揚程の変化となって現れたことが知られる。

**3.2 気液二相流時の揚程変化** 水流量を $\phi_L=0.033$ および0.099一定に保ち、空気流量(係数 $\phi_g$ )を増減させたときの揚程変化を図7に示す。揚程の急低下が生じる $\phi_g/\phi_L$ を羽根車で比較すればIM2025、2060ともに同様の傾向を示しており、小 $\phi_L$ 時にはIM<sub>SO</sub>、IM<sub>OO</sub>羽根車の順で、大 $\phi_L$ 時にはIM<sub>IO</sub>、IM<sub>O</sub>羽根車の順で高い。また側板あるいは出口車板のみを取外したIM<sub>SO</sub>、IM<sub>DO</sub>羽根車は大 $\phi_L$ 時には密閉形のIM<sub>C</sub>羽根車に比べ空気流入による揚程低下が緩やかになって、二相流性能の改善が認められるものの、小 $\phi_L$ 時にはこのような改善効果は認められない。

羽根車の開放化は、その流れにより気体滞留域の発生伸長を抑制するが、車板あるいは側板の一方だけを開放すると主流は流れによって羽根開放面とは反対側に偏り、その抑制効果は低下すると考えられる。そこで、吸込リング、出口側板および出口車板の除去に伴う改善効果量

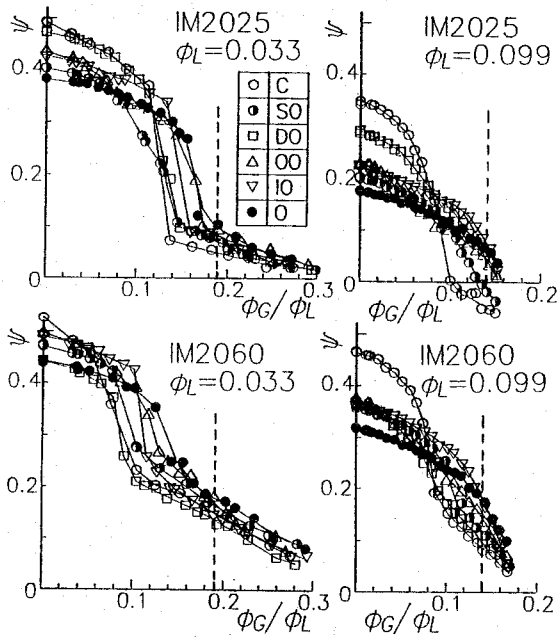


図7 気液二相流時の揚程変化

をそれぞれ  $\Delta\phi_{LI}$ ,  $\Delta\phi_{LO}$ ,  $\Delta\phi_{LOD}$ , 羽根入口・出口での主流の偏りによる改善効果低下量を  $\Delta\phi_I$ ,  $\Delta\phi_O$  とし, 空気流入による揚程低下を密閉形羽根車の場合を基準として単純に次式のように考え, これらの式を用いて揚程の予測を試みる。

$$(\phi_{SP} - \phi_{TP})_{SO} = (\phi_{SP} - \phi_{TP})_C + \Delta\phi_I + \Delta\phi_O$$

$$- \Delta\phi_{LO} - \Delta\phi_{LI}$$

$$(\phi_{SP} - \phi_{TP})_{DO} = (\phi_{SP} - \phi_{TP})_C + \Delta\phi_O - \Delta\phi_{LOD}$$

$$(\phi_{SP} - \phi_{TP})_{OO} = (\phi_{SP} - \phi_{TP})_C - \Delta\phi_{LO} - \Delta\phi_{LOD}$$

$$(\phi_{SP} - \phi_{TP})_{IO} = (\phi_{SP} - \phi_{TP})_C + \Delta\phi_I + \Delta\phi_O$$

$$- \Delta\phi_{LI} - \Delta\phi_{LOD}$$

$$(\phi_{SP} - \phi_{TP})_O = (\phi_{SP} - \phi_{TP})_C + \Delta\phi_I$$

$$- \Delta\phi_{LO} - \Delta\phi_{LI} - \Delta\phi_{LOD}$$

ここで下添字SP, TPはそれぞれ水単相流時, 気液二相流時を表し, 左辺および右辺の括弧の項に付いた下添字は各羽根車の呼称に対応する。上式をIM<sub>IO</sub>羽根車を例にとって説明すれば, IM<sub>IO</sub>羽根車はIM<sub>C</sub>羽根車に対して吸込リングと出口車板を除去したものであり, 改善効果量として  $\Delta\phi_{LI}$  と  $\Delta\phi_{LOD}$  が付加される。また羽根入口・出口での主流の偏りを考えれば, 入口・出口で主流の偏りが存在すると考

表2 気液二相流時の揚程予測結果

$\phi_L=0.033$ $\phi_G/\phi_L=10\%$	IM2025		IM2060	
	measured	predicted	measured	predicted
C	⑥ 0.050	⑥ 0.050	⑤ 0.150	⑥ 0.150
SO	④ 0.070	⑥ 0.064	③ 0.163	⑥ 0.152
DO	③ 0.078	③ 0.070	④ 0.157	③ 0.173
OO	② 0.084	① 0.122	② 0.168	① 0.213
IO	④ 0.070	③ 0.070	⑥ 0.147	③ 0.173
O	① 0.097	② 0.102	① 0.178	② 0.193
$\Delta\phi_I$	0.004		0.004	
$\Delta\phi_O$	0.017		0.018	
$\Delta\phi_{LO}$	0.087		0.054	
$\Delta\phi_{LI}$	0.040		0.040	
$\Delta\phi_{LOD}$	0.041		0.043	

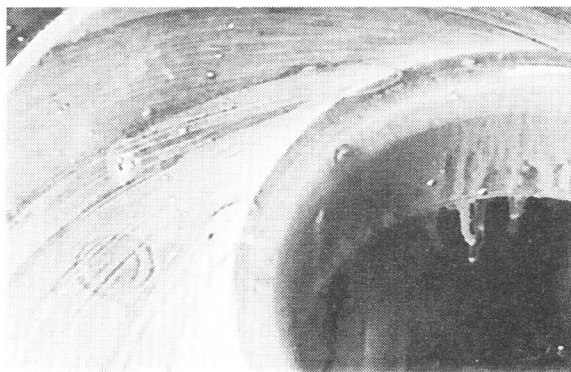
$\phi_L=0.099$ $\phi_G/\phi_L=14\%$	IM2025		IM2060	
	measured	predicted	measured	predicted
C	⑥ -0.047	⑥ -0.047	⑥ 0.087	⑥ 0.087
SO	⑥ -0.012	⑥ -0.042	④ 0.117	⑤ 0.106
DO	③ 0.047	③ 0.046	⑤ 0.107	③ 0.148
OO	④ 0.045	④ 0.032	③ 0.142	④ 0.110
IO	① 0.077	② 0.053	① 0.183	① 0.173
O	② 0.065	① 0.057	② 0.170	② 0.171
$\Delta\phi_I$	0.010		0.010	
$\Delta\phi_O$	0.008		0.008	
$\Delta\phi_{LO}$	0.038		0.034	
$\Delta\phi_{LI}$	0.089		0.089	
$\Delta\phi_{LOD}$	0.109		0.127	

えられ(図6), 改善効果低下量としては  $\Delta\phi_I$ ,  $\Delta\phi_O$  の両者が付加されるが, これらの値は二相流時における水単相流時からの揚程低下を考えるとき, 改善効果量は負の値として, 改善効果低下量は正の値として付加されることになる。同様にIM<sub>O</sub>羽根車では, 密閉形のIM<sub>C</sub>羽根車に対して吸込リング, 出口側板・車板を除去したものであるので, 改善効果量  $\Delta\phi_{LI}$ ,  $\Delta\phi_{LO}$ ,  $\Delta\phi_{LOD}$  が負の値として, 主流の偏りは入口部のみに存在すると考えられる(図6)ので, 改善効果低下量は  $\Delta\phi_I$  が正の値として付加され, 上式のようになる。  $\Delta\phi_{LI}$ ,  $\Delta\phi_{LO}$ ,  $\Delta\phi_{LOD}$ ,  $\Delta\phi_I$ ,  $\Delta\phi_O$  を実験結果(図7)から見積り, これらの式より求めた二相流時における各羽根車の揚程予測結果を実測値の結果と比較して表2に示し, 予測点の気液混合比を図7に破線で示す。水単相流時の場合と同様, 数値の定量的な議論は意味が無いが, 表中○で囲んだ計算結果の順位は実測値の結果とほぼ一致した傾向を示している。以上の結果により, 羽根車を半開放・開放化することで得られる二相流性能の改善には, 主流の羽根高さ方向の偏り度合と羽根開放端からの流れの強さの双方が影響しているものと考えられる。また, 羽根車の開放化による二相流性能の改善は低い羽根高さほど有効であると推察され, Partial emission type の開放形羽根車が有効な二相流性能を示す一因がここにある。<sup>(15)(16)</sup>

3.3 羽根入口流れの油膜法観察結果 羽根入口における主流の偏りの裏付けを得る一方策として油膜法による流れの可視化を試みた。図8に吸込リングをケーシングに固定した場合および羽根車に取付けた場合のそれぞれについて油膜法による写真を示す。実験はIM2025羽根車を用いて行



(a) 吸込リングを羽根車に取付けた場合



(b) 吸込リングをケーシングに固定した場合

図8 羽根入口流れの油膜法可視化写真

い、水流量は無衝突流入流量係数  $\phi_{LS}=0.069$  付近とした。吸込リングを羽根車に取付けた場合は相対限界流線が、ケーシングに固定した場合は絶対限界流線が現れることになるが、この場合羽根車の回転の影響で正確な絶対限界流線は得られていない。しかしながら、このことを考慮しても写真の結果をみれば、吸込リングを羽根車に取付けた場合(図8(a))は流れが軸方向から半径方向へ転向する曲がり部においても(相対限界)流線が連続的であるのに対して、ケーシングに固定した場合(図8(b))には曲がり部の直後には、はく離線らしきものが認められる。このことは、吸込リングが羽根車から除去された場合には流れが軸方向から半径方向へ転向する曲がり部にはく離領域が存在することを意味し、ひいては羽根入口部における主流の偏りの存在を示唆するものと考えられる。

#### 4. ま と め

遠心ポンプ羽根車の開放化が気液二相流時の揚水性能に及ぼす影響について、次の諸点を明らかにした。

- (1) 気液二相流時におけるポンプの揚水性能改善には羽根車の開放化が有効で、これには羽根高さ方向の主流の偏りと羽根開放端からの流れの強さの双方が影響している。
- (2) 羽根車の開放化により気液二相流性能の改善を得る場合、羽根開放端からの流れが有効に作用する羽根高さが存在するものと考えられる。

#### 文 献

- (1) 古川・佐藤, 混相流, 6-4, (1992), 379.
- (2) Furuya, O., Trans. ASME, J. Fluid Eng., 107-1, (1985), 139.
- (3) 峯村・内山, 日本機械学会論文集, 58-550, B(1992), 1803.
- (4) 村上・峯村, 日本機械学会論文集, 39-328, (1973), 3715.
- (5) 世古口・ほか2名, 日本機械学会論文集, 49-445, B(1987), 1859.
- (6) 古川・佐藤, 混相流, 7-1, (1993), 5.
- (7) 古川・ほか3名, 九州大学工学集報, 63-5, (1990), 535.
- (8) 古川・ほか3名, 日本機械学会講演論文集, 910-62, B(1991), 165.
- (9) 古川・ほか2名, 日本機械学会論文集, 60-578, B(1994), 3421.
- (10) 佐藤・ほか2名, 日本機械学会論文集, 59-567, B(1993), 3513.
- (11) 古川・ほか3名, 日本機械学会論文集, 53-494, B(1987), 3038.
- (12) 村上・峯村, 日本機械学会論文集, 42-354, (1976) 489.
- (13) 横山, 日本機械学会誌, 64-515, (1981), 1689.
- (14) Howard, J.H.G., Kittmer, C.W., ASME, Ser. A, (1975), 207.
- (15) 吉田・ほか2名, 日本機械学会講演論文集, 910-62, B(1991), 168.
- (16) 峯村・ほか3名, 日本機械学会講演論文集, 943-1, (1994), 62.